

탄성파시험에 의한 프리캐스트 슬래브궤도의 강성구조와 충전성능 평가

Evaluation of Stiffness Structure and Grouting Efficiency beneath the Precast Slab Track by Elastic Wave Tests

이일화*

조성호**

장승엽*

강윤석*

한성우***

Lee, Il-Wha Joh, Sung-Ho Jang, Seung-Yup Kang, Youn-Suk Han, Sung-Woo

ABSTRACT

Recently, precast concrete tracks are replacing ballast track for efficient and economic maintenance of track. Precast concrete railroad tracks are manufactured in factory, and transported to railroad construction site for installation. Therefore, quality of precast concrete track itself should be sufficiently good. On the contrary to the convenient manufacturing of precast concrete track, the installation of a precast concrete track requires careful steps. Typically, a precast concrete track is placed on an approximately 15-cm thick lean concrete layer. A mortar is filled between lean concrete layer and precast concrete track to adjust the sloping angle of a precast concrete track for a safe train operation at a curvy section. Then, the use of filled mortar produces a void underneath a precast concrete track, which is harmful to structural safety of a precast concrete track under cyclic loading. Therefore, it is essential to make sure that there is no void left beneath a precast concrete track after mortar filling. In the continuous resonance method, the amplitude of frequency response measured using an instrumented hammer and an accelerometer is plotted against a pseudo-depth, which is half of the wave velocity divided by frequency. The frequency response functions are measured at consecutive measurement locations, 6-cm interval between measurement points, and then combined together to generate a 2-D plot of frequency response. The sections with strong reflections or large amplitude of frequency response are suspicious areas with internal voids and unfilled areas. The 2-D frequency response plot was efficient in locating problematic sections just by examining the color shade of a visualized plot in 2-D format. Some of the problematic sections were drilled to make a visual inspection of mortar filling. The visual image of interface between mortar and precast concrete track was verified using the validity of the continuous resonance technique adopted in this research.

1. 서 론

최근 유지보수비 절감을 목적으로 콘크리트궤도가 신설건설의 주종을 이루고 있다. 이 중 프리캐스트 콘크리트 슬래브궤도는 벼림콘크리트 상부에 슬래브가 설치되는 구조인데, 슬래브의 레벨을 정확히 조정하기 위하여 슬래브와 하부 벼림콘크리트 사이에 시멘트 모르타르 그라우팅재를 충진한다. 재료의 충진성능은 궤도의 안정성에 매우 큰 영향을 미치므로 이에 대한 철저한 품질관리가 요구되는데, 현실적으로 평가하기는 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트궤도의 구조적인 결함과 그라우팅 시

* 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원, 정회원

E-mail : iwlee@krri.re.kr

Tel : (031)460-5326 Fax: (031)460-5319

** 중앙대학교 토목공학과 조교수, 정회원

*** 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 연구원

시공의 불균질 상태에 대하여 열차 운행에 지장을 초래하지 않는 비파괴시험 방법을 제안하고자 하였다. 탄성파 기법이 적용되는 매질의 저변형률 특성의 측면에서 콘크리트 슬래브의 건전도 상태와 그라우팅 충진재의 충진상태를 평가하기 위하여 SASW시험을 수행하였고, 충진상태의 공간적 분포상태를 평가하기 위해서 연속 충격반향시험(Continuous Impact Echo Test)을 수행하였다.

2. 프리캐스트 슬래브궤도

그림 1의 A형 슬래브궤도는 선로방향으로 프리텐션 프리스트레스 콘크리트로, 직각방향으로는 프리스트레싱이 없는 철근만으로 보강되는 것으로 설계된 프리캐스트 슬래브를 노반과 콘크리트 기층(HSB) 위에 올려놓고, 슬래브 하부에 충전재를 주입하여 고정시키는 구조로 이루어진다. 슬래브 패널을 연속적으로 연결하여 선로방향으로 조인트가 없이 연속된 지지구조를 확보함으로써 조인트에서 발생할 수 있는 문제점을 최소화할 수 있게 설계되었다. B형 슬래브궤도는 A형과 동일한 구조를 가지지만, 프리스트레스 콘크리트 대신 철근 콘크리트 슬래브를 적용하고, 슬래브를 서로 연결하는 대신에 기층에 설치된 앵커와 슬래브에 있는 전단포켓을 통해 수평방향으로 지지구조를 형성하여 하부 기층과 일체화하는 구조로 설계, 시공된다.

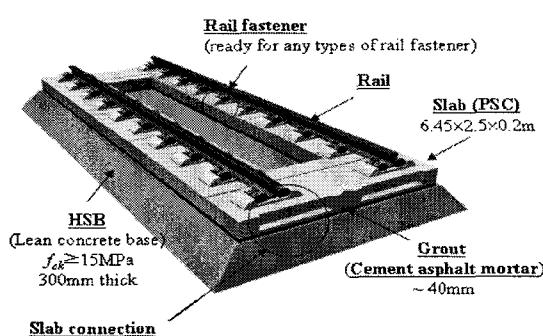


그림 1. A형 슬래브궤도

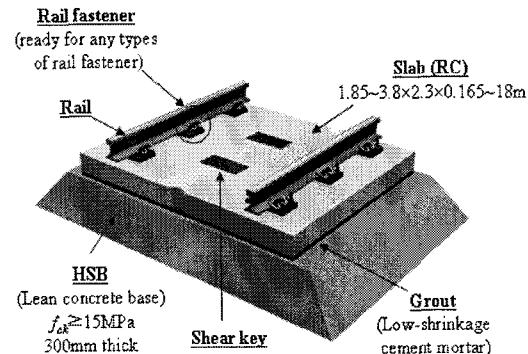


그림 2. B형 슬래브궤도

3. 슬래브궤도의 비파괴 평가를 위한 탄성파기법

3.1 SASW 기법(Spectral Analysis of Surface Waves Method)

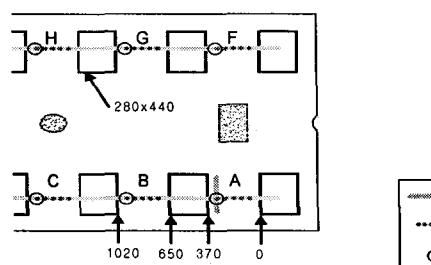
SASW 기법은 지반이나 구조물에 대하여 전단 강성의 깊이별 변화를 추정하기 위하여 비파괴적으로 수행하는 현장 시험법이다. 충격이나 진동에 의해서 발생한 응력파는 지반이나 구조물의 매체를 통하여 사방으로 전파되어 나가는데, 진동원에서 일정 거리만큼 떨어진 지표면에 설치한 진동 감진기에 의해 지반이나 구조물의 진동을 측정하게 된다. 이렇게 지표면에서 응력파를 발생시키고 일정 위치만큼 떨어진 곳에서 진동에 의한 지반의 진동을 측정하여 하부지반의 지층구조와 깊에 따른 S-파 속도분포를 구하는 것이 SASW 시험방법이라고 할 수 있다[2].

3.2 Impact Echo 시험

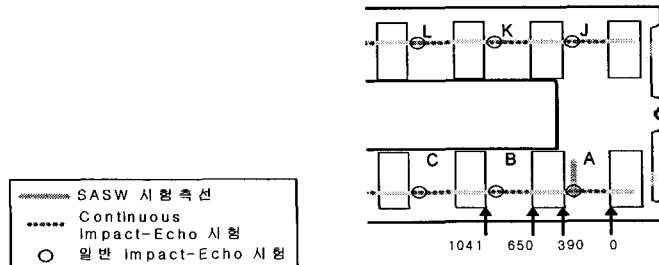
물리적인 충격에 의해서 발생이 되는 탄성파는 한 입자의 진동이 인접 입자로 전달되면서 전파가 된다. 탄성파가 여러 층으로 구성되어 있는 매체를 통과할 때에는 층과 층사이의 음향 임피던스에 의해 영향을 받게 된다. 중간 임피던스 차이가 클 때에는 탄성파가 인접 층으로 전파되기보다는 경계면에서 반사되는 비율이 높게 된다. 표면에서 발생된 탄성파가 매질 내부로 전파되다가 공극이나 균열, 충상 박리, 연약층 등과의 경계면을 만나면 반사되어 표면으로 되돌아오게 되는데, 표면으로 돌아온 탄성파는 표면에서 또 반사되어 매질 내부로 전파되는 현상이 발생하고, 이러한 현상은 계속 반복된다. 이 때 표면과 반사면에서 다중반사를 일으키는 지배주파수를 측정하여 매질의 반사면까지 깊이나 매질의 탄성파 속도를 구하는 탄성파 기법이 Impact Echo의 기본 개념이다[3].

4. 슬래브 궤도의 탄성파 시험

슬래브 궤도의 건전도 상태와 충진상태의 평가를 위한 탄성파 시험으로 SASW시험, Impact Echo 시험 등을 수행하였다. 탄성파시험이 수행된 개략적인 위치는 그림 3에서와 같이 슬래브 평면도에 표시하였다. 슬래브의 탄성계수와 탄성파 속도를 측정하기 위한 SASW 시험은 각 슬래브의 물성을 대표할 수 있는 지점에서 수행하였고, 충진상태를 평가하기 위한 Impact Echo 시험은 체결구에 인접한 지점에서 복수로 수행하였다.



(a) A형 슬래브 궤도



(b) B형 슬래브 궤도

그림 3. 콘크리트 슬래브에서 탄성파 시험이 수행된 위치

5. 프리캐스트 슬래브 궤도에 대한 평가

5.1 SASW 시험에 의한 슬래브의 강성구조 평가

SASW 시험으로는 측정지점에서 레일레이파 속도 분산곡선을 결정할 수 있었다. 콘크리트 슬래브 궤도의 탄성계수 또는 탄성파속도 주상도 평가는 슬래브의 section A에서 수행되었다. SASW 시험으로 획득한 시계열 가속도계 신호는 그림 4과 같고, 이를 이용하여 구한 위상각 스펙트럼은 그림 5과 같다. 이로부터 결정한 위상속도 분산곡선과 역산해석을 수행하여 결정한 전단파속도 주상도는 그림 6과 같다. 그림 6(a)의 주상도를 보면 A형 슬래브는 모두 20cm 두께를 가지고 있는데, 표면부의 약 3cm 정도는 내부콘크리트 매질보다 다소 강성이 저하되어 있는 것으로 평가되었다. 즉, 약 3cm 정도의 슬래브 표면층은 양생과정의 특성상 내부 매질보다 다소 약하게 굳어진 것으로 나타난 것인데, 이러한 경향은 전체 A 형 슬래브에 공히 나타나는 현상이다. 그림 8(b)의 B형 슬래브는 약 2.5~5cm 깊이에서 콘크리트의 강도가 저하되는 3층 구조를 보이고 있다. 콘크리트 슬래브의 영탄성계수 및 전단탄성계수는 SASW 시험으로 측정한 탄성파속도로부터 결정될 수 있다. 전단탄성계수(G)와 영탄성계수(E)는 식 (1), (2)에서와 같이 전단파 속도(v_s), 단위질량(ρ), 포아송비(ν)를 이용해서 구할 수 있다.

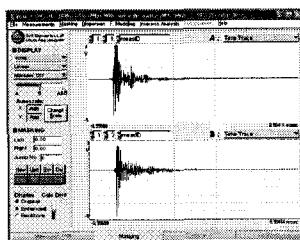


그림 4. 시계열 가속도

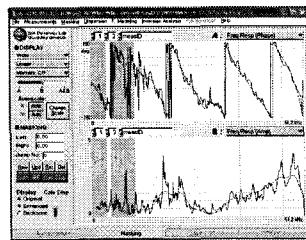
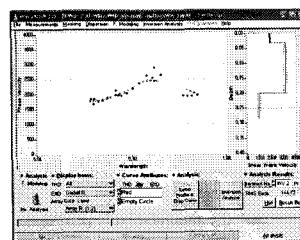
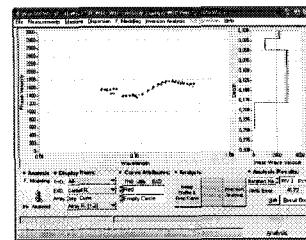


그림 5. 전달함수의 위상각과 진폭 스펙트럼



(a) A형 콘크리트 슬래브



(b) B형 콘크리트 슬래브

$$G = \rho v_s^2 \quad (1)$$

$$E = 2(1 + \nu)\rho v_s^2 \quad (2)$$

A, B형 슬래브에 대한 탄성파 속도의 평균값과 통계분석을 표 1에 정리하였다. 평균 S-파, P-파 속도는 A형 슬래브가 B형 슬래브보다 약 23% 정도 크게 측정되었다. P-파의 경우는 약 820 m/sec, S-파의 경우는 약 520m/sec 정도 더 크게 평가되어, A형 슬래브가 B형 슬래브보다 강성과 강도가 더 큰 것이라는 것을 알 수 있었다. SASW 시험으로 평가한 평균 P-파 속도는 Impact-Echo 시험데이터 정리에도 활용하였다.

표 1. SASW 시험으로 측정한 콘크리트 슬래브의 탄성파속도의 특징

	A형 슬래브		B형 슬래브	
	P-파속도	S-파속도, m/sec	P-파속도, m/sec	S-파속도, m/sec
최저	3824.6	2411.6	3182.6	2006.8
최고	4730.1	2982.5	4066.3	2564.0
평균	4345.5	2740.1	3522.4	2221.0
표준편차	260.3	164.2	238.3	150.3

5.2 Impact-Echo 시험에 의한 그라우팅 충진상태 평가

슬래브 하부의 그라우팅 충진상태가 양호하면 슬래브 표면에서 발생한 탄성파는 충진층을 통과하여 베림콘크리트 바닥 면까지 전파되어 가고 베림콘크리트 바닥 면에서 반사파가 발생한다. 반면, 그라우팅 충진상태가 양호하지 않으면 즉, 콘크리트 슬래브하부 면과 베림콘크리트 사이에 공간이 존재하면 탄성파는 콘크리트 슬래브하부 면에서 반사파가 발생하게 된다. 이러한 반사파 발생위치를 찾기 위해서 Impact-Echo 시험을 적용하였는데, 본 연구에서는 두 가지 측면으로 Impact-Echo 시험을 적용하였다. 첫 번째는 일반 Impact-Echo 시험으로 측정지점 하부 매질을 국부적으로 평가하는 것이었고, 두 번째는 Impact-Echo 시험을 인접한 여러 측점에서 수행하여 반사파 발생추이를 공간 영역에서 정성적으로 평가하는 연속 Impact-Echo 시험을 적용하는 것이었다.

5.2.1 일반 Impact-Echo 시험적용 결과

일반적으로 Impact-Echo 시험에서는 양단자유면의 경계면에서 발생하게 되는 공진현상을 찾게 되고, 실제적으로는 전달함수의 진폭스펙트럼에서 첨두치를 보여주는 공진주파수에 관심을 갖게 된다. 공진주파수와 매질의 P-파 속도를 이용하면 P-파의 반사면 위치를 알 수 있다. 본 연구에서는 Impact-Echo 시험결과의 도시에 있어서 주파수영역으로 표현하는 일반적인 방법보다는 탄성파의 파장 영역으로 표현하였다. 탄성파의 파장은 대략적으로 탄성파 반사면 심도의 2배 정도에 해당되는 것으로 식 (3)으로 계산된다. 여기서, v_p 는 매질의 P-파 속도, f 는 주파수, λ 는 의사심도이다.

$$\lambda = \frac{V_p}{f} \quad (3)$$

그림 7에 예시한 바와 같이, 전달함수의 진폭스펙트럼을 파장 영역으로 도시하여 공진현상을 파악하였다. 공진현상이 나타나는 파장이 약 0.4m 정도이므로 반사경계면은 약 0.2m에 위치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 반사경계면이 뚜렷하게 존재하지 않는 경우는 그림 8에서 회색으로 도시된 경우와 유사한 경우이다. 공진현상을 나타내는 강한 첨두모양이나 큰 진폭을 보여주지 못하고 있다.

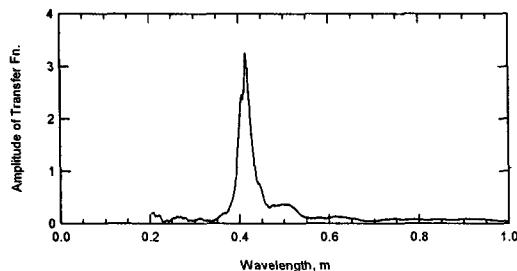


그림 7. Impact-Echo 시험결과의 파장 영역

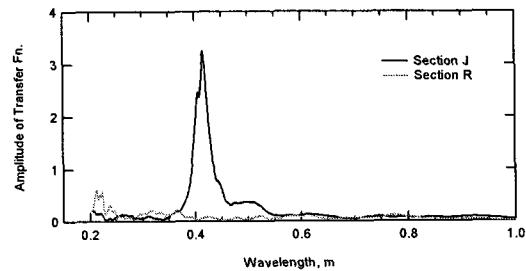


그림 8. 명확한 반사경계면에 따른 측정 차

따라서 콘크리트 슬래브 하부의 충진상태가 양호하지 않은 경우는 다음과 같은 기준을 모두 만족하는 경우라고 정의할 수 있다.

- 공진현상을 나타내는 강한 첨두 모양이 측정되는 경우
- 공진 파장에 대한 진폭이 현저히 큰 경우
- 첨두치의 진폭이 1.0을 초과하는 경우
- 동일 지점에서 타격위치를 달리하여 측정한 두 시험결과가 모두 불량일 경우

그림 9는 B형 슬래브에서 수행한 일반 Impact Echo 시험 결과로 주파수별 진폭스펙트럼으로서 위치별 타격위치를 달리하여 2회 시험한 결과이다. 대부분의 시험위치에서는 특별한 공진현상이 발생하지 않았으나, 위치 Section-B에서는 약 0.4m 파장에서 첨두 진폭이 현저히 크게 나타나 충진상태가 불량할 것으로 판단된다.

5.2.2 연속 Impact-Echo 시험적용 결과

Impact-Echo 시험은 구조체내의 국부적 이상상태에 대해서도 예민하게 반응을 하기 때문에, 콘크리트 슬래브 내부에 존재하는 국부적 충진 결함에도 예민하게 평가될 가능성이 있다. 따라서 국부적 지점에서의 측정결과를 슬래브 전체로 확대해석하여 결론을 내리기 보다는 가능한 넓은 지역의 측정결과를 종합하여 최종판단을 내리고자 연속 Impact Echo시험을 수행하였다. A형 슬래브의 경우에는 체결구 사이에 모두 6개 Impact Echo시험을 6cm 간격으로 수행하여 모두 54개의 시험결과를 결합하여 그림 10과 같은 형태의 2차원 영상으로 표현하였다. 그림 10은 양호하다고 판단되는 슬래브와 양호하지 않다고 판단되는 슬래브의 진폭스펙트럼을 비교한 그림이다. 충진성에 대한 판단기준은 2차원 영상에서 붉은 색이 강할수록 반사파의 진폭이 큰 것으로 표현되고, 파란색이 강할수록 반사파의 진폭이 작은 것으로 표현된 것이다. 그림 10(a)의 경우는 대체적으로 푸른색 계통으로 도시되어 있어서 파장 0.4m 인근에 강한 반사파를 찾아볼 수 없다. 반면, 그림 10(b)의 경우, 2~5.5m 구간을 살펴보면, 파장 0.4m 인근에 강한 반사파가 밀집해 있는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 10(b)의 Fense side 2~5.5m 구간은 충진상태의 불량 가능성이 높은 경우로 판단된다. 즉, 연속 Impact Echo시험에서 충진상태의 불량가능성이 있는 경우에 대한 판단기준은 시험으로 결정된 진폭스펙트럼의 2차원 영상에서 붉은 색의 영역이 넓은 지역으로 퍼져서 수평 방향의 띠를 형성하는 경우이다.

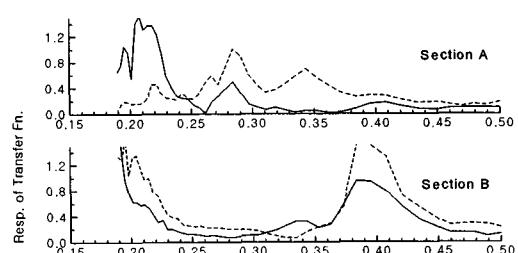
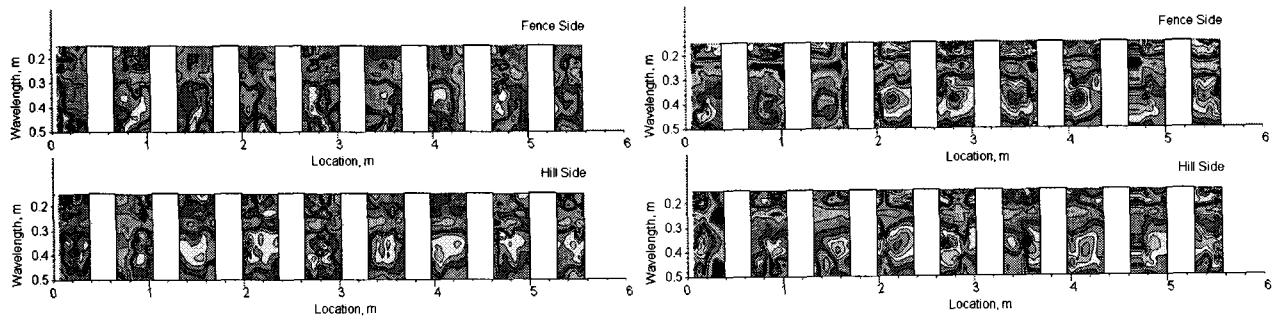


그림 9. 일반 Impact-Echo 시험으로 평가한 진폭스펙트럼(B형, Section-A, B)



(a) 양호하다고 판단되는 슬래브

(b) 양호하지 않다고 판단되는 슬래브

그림 10. 연속 Impact-Echo 시험결과: 반사파의 진폭스펙트럼을 위치-파장의 영역으로 도시

6. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 슬래브케도의 구조적 건전도 상태와 충진상태를 탄성파 시험에 의해 비파괴적으로 평가하고자 하였다. 시험 결과, SASW 시험 및 Impact Echo 시험과 같은 탄성파 기법으로 콘크리트 슬래브의 재료 강성과 반사경계면에 대한 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되어 향후, 콘크리트케도의 결함을 찾아내는 방법으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 조성호, 목영진, 장현삼 (2000), “지반의 동적 물성치 측정을 위한 탄성파 기법과 결과의 이용, 지반, 지반공학회,” 제 16권 2호, pp.34-50.
2. 이일화(2006), “충격반향기법을 이용한 포장케도 모르터의 충진성능 평가”, 한국철도학회 춘계학술 발표회.
3. Olson, L.D. and Wright, C. (1990), "Nondestructive Testing for Repair and Rehabilitation," Concrete International: Design and Construction, ACI, march, pp.58-64.
4. Rosenbald, B. L. (1995), Evaluation of Stress-Wave Methods for Implementation into a Rolling System to Detect Pavement Irregularities, Master Thesis, The University of Texas at Austin, p.216.